

斥水程度对脱水土壤水分特征曲线的影响

陈俊英¹, 刘畅¹, 张林^{2*}, 向友珍¹, Leonid Gillerman³, 柴红阳¹

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 旱区农业水土工程教育部重点实验室, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100; 3. 本古里安大学 Blaustein 沙漠研究所, 以色列思德博克 84990)

摘要:为研究斥水程度对土壤水分特征曲线的影响, 该文基于滴水穿透时间法, 人工配置7种斥水程度的黏壤土(L0~L6)和6种斥水程度的砂土(S0~S5), 用高速离心机测定其土壤水分特征曲线, 应用 van Genuchten-Mualem (VG) 模型进行拟合, 得出 VG 模型水力参数。结果表明: 在同一吸力条件下, 斥水黏壤土的含水率比斥水砂土的高; 随着斥水程度增加, 在相同吸力情况下, 土壤含水率随斥水程度增大而减小; 斥水黏壤土的残余含水率随着斥水程度增加而减小, 斥水砂土 S0~S3 的残余含水率没有差异, S4、S5 的残余含水率显著减小; 斥水黏壤土和砂土进气值的对数与斥水剂添加量呈负线性相关; 随着斥水程度增加, 田间持水率减小, 凋萎系数没有明显差异, 重力水增加, 有效水和易有效水减小, 易利用水比例随着斥水程度增加而减小; 对于斥水黏壤土, 微孔隙(0.3~<5 μm)和小孔隙(5~<30 μm)含量随着斥水程度的增加明显减小, 土壤空隙(≥100 μm)随着斥水程度的增加急剧增加; 对于斥水砂土, 中等孔隙(30~<75 μm)的含量随斥水程度的增加明显增加。该研究成果可为斥水土壤的入渗、蒸发和数值模拟提供理论支持。

关键词:土壤水分; 孔隙; 脱水; 水分特征曲线; 斥水

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.21.022

中图分类号: S152.7 文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-21-0188-06

陈俊英, 刘畅, 张林, 向友珍, Leonid Gillerman, 柴红阳. 斥水程度对脱水土壤水分特征曲线的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21): 188-193. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.21.022 http://www.tcsae.org

Chen Junying, Liu Chang, Zhang Lin, Xiang Youzhen, Leonid Gillerman, Chai Hongyang. Impact of repellent levels on drainage soil water characteristic curve[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(21): 188-193. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.21.022 http://www.tcsae.org

0 引言

土壤斥水性是土壤中普遍存在的现象, 几乎所有的土壤都存在不同程度的斥水性^[1-2], 土壤斥水性表现为水滴在斥水土壤表面不能迅速入渗或铺展的现象, 斥水土壤的斥水持续时间可以从几秒到数天^[3-4], 甚至更长时间^[5], 斥水土壤厚度可达几十厘米^[6], 斥水性改变了土壤水分的三维分布和动力学特性, 这就使得斥水土壤入渗能力降低^[7], 土壤水分分布不均匀, 容易形成优先流^[4]; 土壤持水能力降低, 最终导致农作物减产^[8]。对于灌溉时间较短, 但频率较高的灌溉方式, 如大流量滴灌等, 斥水土壤的研究就很有必要, 因为这种方式下, 由于斥水土壤的存在, 就会导致土壤入渗性能发生变化, 可能形成地表积水使得蒸发量加大, 或者形成指流现象, 导致深层渗漏发生, 使得灌溉水利用效率降低, 因此更快更准确的试验和模拟斥水土壤的水分运动特性具有重要的理论意义。

土壤水分特征曲线(简称土-水曲线)表征土壤水的能量(土壤水吸力)和数量(土壤含水率)之间的关系, 反映土壤水分基本特性, 常被用于研究土壤水分保持和运动, 对评价土壤水分的有效性和持水性具有重要意义^[9-10], 土-水曲线主要受土壤质地和土壤结构的影响^[11]。目前关于斥水土壤的研究主要集中在斥水土壤的水分扩散^[12]、田间1D和2D水流运动^[13-14]、斥水土壤的入渗过程^[15-18]、含水率对斥水土壤的影响^[19-20]等方面, 关于斥水土壤水分特征曲线影响因素方面研究成果较少。已有研究表明, 在相同吸力的情况下斥水土壤与亲水土壤的土壤含水率是不同的^[21]。Bauters等^[22]对4种人工配置的斥水土壤进行入渗试验, 发现湿润锋受斥水程度的影响, 土壤进水值随斥水程度的增加而增加。Ustohal等^[23]通过测定斥水土壤的粒径分布及土壤水分特征的吸湿和脱湿曲线, 由粒径分布和土壤质地预测了斥水土壤水力性质。Czachor^[24]测定了不同斥水土壤类型和斥水程度土壤的吸湿和脱湿土壤水分特征曲线, 得出斥水程度对吸湿曲线比脱湿曲线的影响大。Lamparter^[25]测定了人工配置的3种斥水程度砂土和1种亲水砂土的土-水曲线和接触角, 得出土壤水力特性与接触角相关性很高, 进气值和饱和导水率与接触角呈线性相关。Diamantopoulos等^[26]测定了人工配置的3种斥水程度砂土和1种亲水砂土的土-水曲线, 得出斥水程度对土壤水力特性影响较大。尽管有关斥水程度对土壤水分特征曲线影响的研究已经取得一些成果, 但多数都只是研究了3~4种斥水程度的砂土土壤水分曲线, 并没有对斥水程度对土-水曲线的影响以及土

收稿日期: 2017-02-27 修订日期: 2017-10-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51409221、51349001); 西北农林科技大学基本科研业务费(2452017116); 中央高校基本科研业务费青年培育专项

作者简介: 陈俊英, 陕西咸阳人, 副教授, 主要从事节水农业和水土资源高效利用方面的研究。Email: cjyrose@126.com

*通信作者: 张林, 湖北随州人, 研究员, 主要从事节水灌溉装备与理论研究。Email: zl0211wy@163.com

壤进气值、土壤水分常数和孔径详细研究。基于此，本文选用了人工配置的 7 种斥水黏壤土和 6 种斥水砂土，测定其土壤水分曲线，应用 van Genuchten-Mualem (VG) 模型^[27]进行拟合，得出 VG 模型水力参数，分析斥水程度对土壤水分特征曲线、土壤进气值、土壤水分常数和土壤孔径分布的影响，以期为深入理解斥水土壤水分运移机制提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试土壤与预处理

本试验供试土壤取自陕西杨凌渭河一级阶地和三级阶地 0~30 cm 的耕作土壤，土壤经风干、去杂，过 2 mm 标准孔筛筛子，采用 MS2000 型激光粒度仪（马尔文，英国）对试验土壤颗粒组成进行测定：一级阶地土壤粒径 <0.002 mm、0.002~<0.02 mm 和 0.02~2 mm 的土壤颗粒占比（质量分数）分别为 3.03%、7.19% 和 89.78%，三级阶地分别为 17.25%、44.38% 和 38.37%，根据国际质地三角形可知，一级阶地供试土壤为砂土，三级阶地供试土壤为黏壤土。

土壤产生斥水性的原因有很多，实验室斥水土壤一般采用向亲水土壤中加入斥水材料的方法得到^[4,28]。根据 Doerr^[29]提出的滴水穿透时间（water drop penetration time, t_{WD} ）法分类标准，将土壤划分为：亲水（滴水穿透时间 $t_{WD} < 5$ s）、弱斥水（ $5 \leq t_{WD} < 60$ s）、强斥水（ $60 \leq t_{WD} < 600$ s）、严重斥水（ $600 \leq t_{WD} < 3\ 600$ s）和极度斥水（ $t_{WD} \geq 3\ 600$ s）5 个斥水程度。供试的黏壤土和砂土取回后均表现为亲水性质，通过向这 2 种土壤中添加不同质量的斥水性材料，即可得到不同斥水程度的土壤。配置过程为，研磨一定质量的斥水性材料（十八烷基伯胺）至极细颗粒，均匀撒入 2 kg 土样中拌合均匀，放置 3 d 后，测定土样的滴水穿透时间（取 10 滴水测定的平均值），将供试土壤的斥水性材料添加量（1 kg 土壤添加斥水剂的克数）、斥水程度和处理详列于表 1。

表 1 供试土壤斥水剂添加量、斥水程度和处理
Table 1 Amount of repellent powder added to soils, repellent levels and treatment

土壤类型 Soil type	处理 Treatment	斥水剂添加量 Amount of repellent powder/(g·kg ⁻¹)	斥水程度等级 Repellent level
黏壤土 Clay loam	L0	0	亲水 Wettable
	L1	0.2	弱斥水 Slight
	L2	0.3	弱斥水 Slight
	L3	0.4	强斥水 Moderate
	L4	0.5	强斥水 Moderate
	L5	0.6	严重斥水 Severe
	L6	0.8	极度斥水 Extreme
砂土 Sand	S0	0	亲水 Wettable
	S1	0.06	弱斥水 Slight
	S2	0.08	强斥水 Moderate
	S3	0.09	严重斥水 Severe
	S4	0.115	极度斥水 Extreme
	S5	0.12	极度斥水 Extreme

1.2 试验方法与测定内容

将配制好的土壤样品按预设容重 1.33 g/cm³ 装入容积为 100 cm³ 的环刀，各处理均重复 4 次（离心机每次只能测 4 个样品）。为计算土壤含水率，试验前将环刀置于蒸馏水中浸泡至饱和，试验后将环刀置于 105 °C 烘箱内干燥至质量恒定，土壤含水率最终结果取 4 个重复的均值。

将饱和环刀样品置于 CR21G II 型高速恒温冷冻离心机（日立，日本）内测定土壤水分特征曲线（简称土-水曲线），测定时机内恒温 4 °C，将待测样品放入离心机装置中，选定离心机的转速分别为 900、1 700、2 200、2 800、3 100、5 300、6 900 和 8 100 r/min，与其对应的平衡时间分别为 30、45、60、60、60、90、90 和 90 min，对应的吸力分别为 88.8、316.6、530.3、859、1 053、3 018、5 216 和 7 189 cm。每次离心结束后，采用电子天平（ES-3002H 型）称量质量，获得土壤质量含水率，再将其转换为体积含水率。

1.3 土壤水分特征曲线拟合

常用土壤水分曲线模型有 VG 模型、Brooks-Corey 模型、对数正态（lognormal distribution）模型和双重孔隙度（dual-porosity）模型等。通常基于实测吸力和土壤含水率数据，采用模型拟合水力参数，评价土壤持水性能。本文选取应用最为广泛的 VG 模型^[27,30]。

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\theta(h)$ 为土壤体积含水率，cm³/cm³； θ_r 为土壤残余体积含水率，cm³/cm³； θ_s 为土壤饱和体积含水率，cm³/cm³； h 为压力水头（负压），cm； α 近似为进气值的倒数，cm⁻¹； m 、 n 为形状参数，与土壤孔径分布有关， $m=1-1/n$ ， α 、 m 、 n 是影响土壤水分特征曲线形态的经验参数。

1.4 数据分析

采用 Excel2007 进行函数计算，SPSS20.0 进行统计分析，Sigmaplot12.0 进行图表绘制。

2 结果与分析

2.1 斥水程度对土壤水分特征曲线的影响

图 1 为试验测得的不同斥水程度土壤土水分特征曲线。从图 1 可以看出，对于斥水黏壤土和砂土，在不同斥水程度条件下，随着吸力增加，土壤含水率减小，这与 Bauters 等^[22]和 Czachor^[24]研究的变化趋势一样，但是 Bauters 的土壤吸力是测定的，而且其吸力非常小（≤20 cm）。从图 1 可以看出在低吸力（ $s \leq 1\ 000$ cm）时，各处理土-水曲线变化平缓，说明在此吸力范围内，随吸力增加，土壤含水率变化较大，可能由于该阶段土体通过大孔隙进行排水，即使吸力变化不大，土壤含水率也会发生明显改变；当吸力较高（ $s > 1\ 000$ cm）时，各处理的土-水曲线呈陡直状，说明此时土壤含水率下降速度较慢，这是因为在高吸力阶段，随着吸力增加，斥水土壤只有较小的孔隙能保留水分，土体对其吸持力较大，因此这一阶段的土壤含水率随吸力增加无显著变化。同时从图 1 还可以看出，同一吸力条件下，斥水黏壤土的含水率比

斥水砂土的高,而且斥水砂土的土-水曲线在高吸力阶段比斥水黏壤土的土-水曲线陡直,低吸力阶段比斥水黏壤土的土-水曲线平缓。这是因为斥水黏壤土中的土壤黏粒质量分数(17.25%)比斥水砂土的高(3.03%),土壤黏粒含量增多,使得土壤中的细小孔隙发育,斥水黏壤土的孔径分布比斥水砂土的分布均匀,因此随着吸力增加,含水率呈缓慢减小趋势,而对于斥水砂土而言,由于其砂粒含量较多,土壤中的大孔隙数量较多,因此当吸力达到一定值后,这些大孔隙中的水分首先排出,土壤中仅有少量的水存留,因此,斥水砂土的土-水曲线在低吸力阶段平缓,在高吸力阶段陡直。

从图 1a 可以看出,随着黏壤土斥水程度增加,其土-水曲线明显向左推移,即在相同吸力情况下,斥水程度越大,土壤含水率越小,这是因为斥水程度越高,土壤对水的排斥性越大,因此在相同吸力时,斥水程度较大的土壤脱水相对较多,含水率也就变小。从图 1b 可以看出,随着砂土斥水程度增加,其土-水曲线在低吸力阶段,明显向左推移,在高吸力阶段,其土-水曲线变化不大明显。说明斥水程度在低吸力阶段对斥水黏壤土和砂土的影响都比较大,而在高吸力阶段,斥水程度对黏壤土影响明显,对斥水砂土影响不大。这是因为斥水砂土的小孔隙非常少,在高吸力阶段,斥水砂土的小孔隙内可储存的水量已经非常少,因此斥水程度对其影响不明显,而对于黏壤土,还存在很多细小孔隙,斥水程度则对其影响明显。

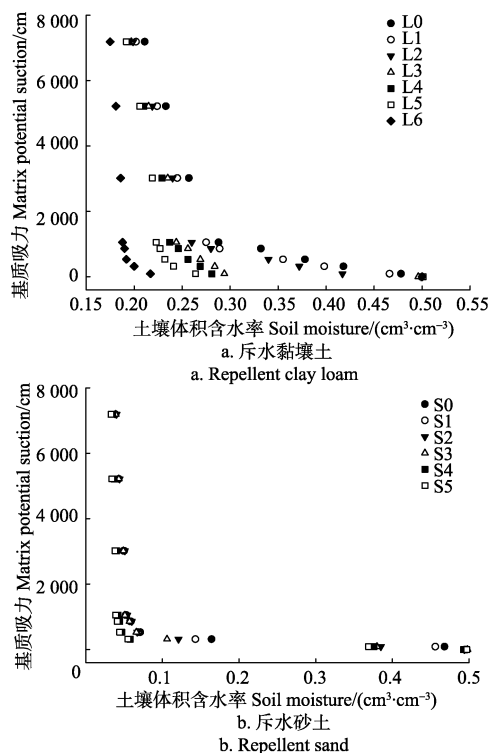


图 1 斥水程度不同的土壤的水分特征曲线

Fig.1 Soil water characteristic curves of different repellent levels

2.2 不同斥水程度土壤土-水曲线 VG 模型拟合参数

RETIC 软件^[30]由美国盐改中心(US Salinity Laboratory)开发,可采用不同土壤水分特征曲线模型拟合实测试验数据,分析非饱和土壤水力性质,本文采用

VG 模型,非饱和导水率采用 Mualem 模型($m=1-1/n$),拟合各处理的 VG 模型参数见表 2。

表 2 不同斥水程度土壤水分特征曲线 VG 模型拟合参数
Table 2 Soil moisture characteristic curve parameters of VG model for soils with different repellent levels

土壤类型 Soil type	处理 Treatment	残余含水率 Residual soil moisture/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	饱和含水率 Saturated soil moisture/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	进气值倒数 of air entry value a/cm^{-1}	形状系数 Shape parameter n
斥水黏壤土 Repellent clay loam	L0	0.069a	0.505a	0.005a	1.315a
	L1	0.068b	0.505a	0.007b	1.304b
	L2	0.066c	0.496a	0.014c	1.251c
	L3	0.064d	0.496a	1.969d	1.112d
	L4	0.063e	0.500a	6.565e	1.103e
	L5	0.063e	0.501a	92.820f	1.087f
斥水砂土 Repellent sand	L6	0.060f	0.501a	5 283.000g	1.070g
	S0	0.043a	0.500a	0.00540a	3.336a
	S1	0.043a	0.500a	0.006 24b	3.175b
	S2	0.043a	0.499a	0.009 18c	2.677c
	S3	0.043a	0.502a	0.009 49d	2.790d
	S4	0.040b	0.501a	0.009 56e	3.826e
S5	0.037c	0.500a	0.009 72f	3.812f	

注:同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

Note: Values followed by different letters are significantly different ($P<0.05$).

从表 2 可以看出,对于斥水黏壤土,各处理残余含水率差异显著,即随着斥水程度增加,残余含水率呈减小趋势,残余含水率是土壤水分特征曲线导数为 0 时的土壤含水率,说明随着斥水程度增加,其土壤水分特征曲线的导数逐渐减小;饱和含水率近似于吸力为 0 时的土壤含水率,各处理饱和含水率没有差异,变化不明显,这是因为各处理设定容重一样,对于相同的容重,土壤所占的体积一样,其饱和含水率一样;各处理的参数 α 值差异显著,黏壤土的 α 值随着斥水程度增加而迅速增加;各处理的参数 n 值差异显著, n 值随斥水程度增加而减小,对于同一类型土壤参数 n 值大时,曲线变化较缓,这也与图 1a 的变化趋势一致。

同时从表 2 还可以看出,对于斥水砂土,处理 S0~S3 的残余含水率没有差异,而极度斥水的处理 S4、S5 与 S0~S3 之间差异显著,残余含水率减小;饱和含水率与斥水黏壤土的一样,没有差异,原因也相同。各处理的参数 α 值差异显著, α 值随着斥水程度增加而增加,但变化程度较斥水黏壤土小;各处理的参数 n 值差异显著,变化规律随斥水程度先减小再增加。

2.3 斥水程度对土壤进气值的影响

进气值 (air entry value, s_a) 是指空气开始进入土体边界的土颗粒或颗粒集合体的孔隙时所对应基质吸力值^[9],是研究土壤水分保持和运动的重要参数。VG 模型中参数 α 值可近似视为进气值的倒数,土壤的斥水程度可以由斥水剂的添加量(R_x)来表示,分析进气值(令 $s_a=1/\alpha$)的对数与斥水程度的关系见图 2。从图 2 可以看出随着斥水程度增加,土壤进气值的对数减小,其关系符合线性模型,即

$$\log(s_a) = b \cdot R_x + c \quad (2)$$

式中 s_a 为进气值, cm; R_x 为斥水剂添加量, g/kg; b 、 c 为模型参数。

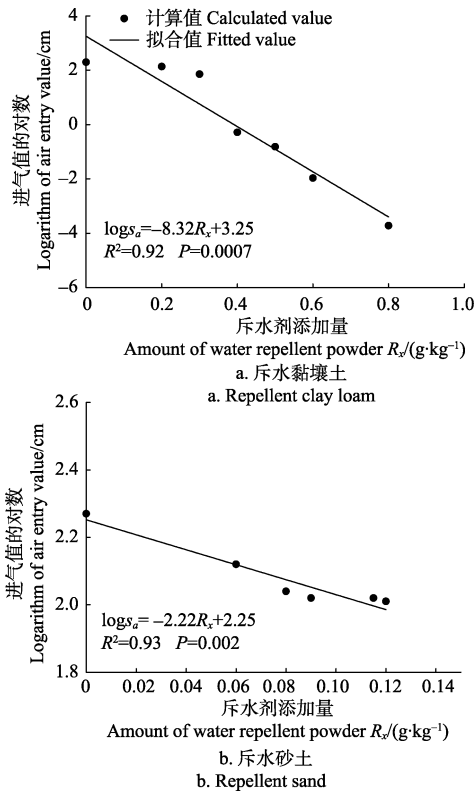


图 2 不同土壤斥水程度与进气值的关系

Fig.2 Relationship between repellent level and air entry value for different soils

从图 2 可以看出对于斥水黏壤土和斥水砂土的进气值对数 ($\log s_a$) 与斥水剂添加量 (R_r) 回归的关系拟合度很高, R^2 分别为 0.92 和 0.93 ($P < 0.01$)。这是因为斥水程度越高, 土壤对水分的排斥性越大, 即土壤对水的吸附力越小, 就使得斥水程度高的土样在较小的吸力条件下就开始并且快速失水。这与 Lamparter^[25]研究得出的砂土进气值随斥水程度增加而减小的趋势是一样的, 但他只研究了 3 种斥水程度的砂土的进气值与斥水程度的关系, 不能得出进气值与斥水程度的定量关系; 与 Bauters 等^[22]得出的结论正好相反, 原因可能是他的进水值和吸力是测定的, 测量的范围非常小 (吸力值小于 20 cm, 进水值小于 4 cm), 在极小吸力下, 容易产生测量误差, 同时其观测的吸力和土壤样品偏少, 影响结果的分析。

2.4 斥水程度对土壤水分常数的影响

基于拟合的土壤水分特征曲线参数, 计算田间持水率、凋萎系数、重力水、有效水、易有效水、无效水及易利用水比例。田间持水率是吸力为 0.2×10^5 Pa 时含水率, 凋萎系数是吸力为 15×10^5 Pa 时的含水率, 重力水是饱和含水率与田间持水率的差, 有效水是田间持水率与凋萎系数之差, 易有效水是田间持水率与毛管断裂持水量 (约为田间持水率的 65%) 之差, 易利用水比例是指易利用水占饱和含水率的比值。从表 3 可以看出对于斥水黏壤土和斥水砂土, 随着斥水程度增加, 田间持水率减小, 说明对于斥水土壤, 随着斥水程度的增加, 土壤毛管悬着水量的最大值降低。各处理之间的凋萎系数差异不大 ($0.172 \sim 0.200$ 、 $0.037 \sim 0.044$ cm^3/cm^3), 说明斥水程度对土壤的凋萎系数影响不大。从表 3 还可以看出, 对于斥水黏壤土和斥水砂土, 重力水随着斥水程度的增加而增加, 重力水是当土壤的含水率超过了田间持水量,

多余的水分不能为毛管力所吸持, 在重力作用下将沿着非毛管孔隙下渗, 说明斥水程度的增加, 减小了毛管力, 使得土壤的重力水增加。同时从表 3 还可以看出, 对于斥水黏壤土和斥水砂土, 有效水和易有效水随着斥水程度的增加而减小, 因此易利用水比例随着斥水程度增加而减小。综上, 斥水程度的增加导致田间持水量、易利用水比例降低, 使得作物可吸收和利用的水分减少, 不利于农作物的生长, 将会导致农作物减产, 因此应该尽量避免土壤的斥水程度增加。

表 3 不同斥水程度下土壤水分常数

Table 3 Soil moisture parameters under different repellent levels

土壤类型 Soil type	处理 Treat ment	田间持水率 Field capacity/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	凋萎系数 Wilt coefficient/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	重力水 Gravity water/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	有效水 Effective water/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	易有效水 Easily available water/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	易利用水比例 Ratio of easily available water/%
黏壤土 Clay loam	L0	0.437	0.180	0.068	0.257	0.153	30.3
	L1	0.415	0.172	0.090	0.243	0.145	28.8
	L2	0.382	0.178	0.114	0.204	0.134	27.0
	L3	0.285	0.200	0.211	0.085	0.100	20.1
	L4	0.272	0.197	0.228	0.075	0.095	19.0
	L5	0.249	0.191	0.252	0.058	0.087	17.4
砂土 Sand	L6	0.227	0.183	0.274	0.044	0.079	15.9
	S0	0.299	0.043	0.201	0.255	0.105	20.9
	S1	0.257	0.043	0.242	0.214	0.090	18.0
	S2	0.190	0.044	0.308	0.147	0.067	13.4
	S3	0.175	0.043	0.327	0.132	0.061	12.2
S4	0.109	0.040	0.392	0.070	0.038	7.6	
S5	0.104	0.037	0.396	0.068	0.037	7.3	

2.5 斥水程度对土壤孔隙分布的影响

根据试验得到的土壤水分特征曲线, 计算出斥水黏壤土和斥水砂土的当量孔径分布曲线, 结合本研究测定范围, 参考土壤学百科全书^[31], 将土壤孔隙当量孔径分为极微孔隙 ($< 0.3 \mu\text{m}$)、微孔隙 ($0.3 \sim < 5 \mu\text{m}$)、小孔隙 ($5 \sim < 30 \mu\text{m}$)、中等孔隙 ($30 \sim < 75 \mu\text{m}$)、大孔隙 ($75 \sim < 100 \mu\text{m}$)、土壤空隙 ($\geq 100 \mu\text{m}$) 6 个孔径段, 可以直观展现斥水程度对土壤孔隙分布的影响, 斥水黏壤土和砂土的分段统计结果见图 3。

从图 3a 可以看出, 对于斥水黏壤土, 斥水程度对于极微孔隙影响不明显, 其占总孔隙体积比例均在 30% 左右; 斥水黏壤土的微孔隙和小孔隙占总孔隙体积比例随着斥水程度的增加明显减小, 中等孔隙为弱斥水处理的 L2 最大, 强斥水、严重斥水、亲水、极度斥水处理逐渐降低; 各处理的大孔隙相差不大, 占比都低于 2%; 由图 3a 可以明显看出, 土壤空隙随着斥水程度的增加急剧增加, 极度斥水处理 L6 占比达 57%, 而亲水处理 L0 只有 2%, 弱斥水处理 L1 和 L2 土壤空隙占比也小于 6%, 强斥水处理 L3 和 L4 土壤空隙占比在 37% 左右, 而严重斥水处理 L5 的土壤空隙占比在 50% 左右。从图 3b 可以看出, 对于斥水砂土, 各处理均没有极微孔隙存在, 微孔隙的占比除了极度斥水的处理 S5 低于 1% 之外, 其余处理微孔隙占比均在 5% 左右, 而且差异不大; 亲水处理 S0 的小孔隙 (85%) 明显高于其他处理, 强斥水、严重斥水和极度斥水的小孔隙占比差异不大, 均在 60% 左右; 从图 3b 还可以明显看出, 中等孔隙的占比随斥水程度的增加明显增加, 其中极度斥水处理 S5 的中等孔隙占比达

40%，而亲水处理 S0 的中等孔隙占比仅有 7%；各处理的大孔隙和土壤空隙占比均比较小，都小于 2%。这些都进一步说明，斥水程度明显减小了土壤的持水能力。这个与 Lamparter^[25]研究的砂土的孔隙分布分布基本一样，但他给出的是孔隙变化的累积图，不能得出不同当量孔隙的含量。

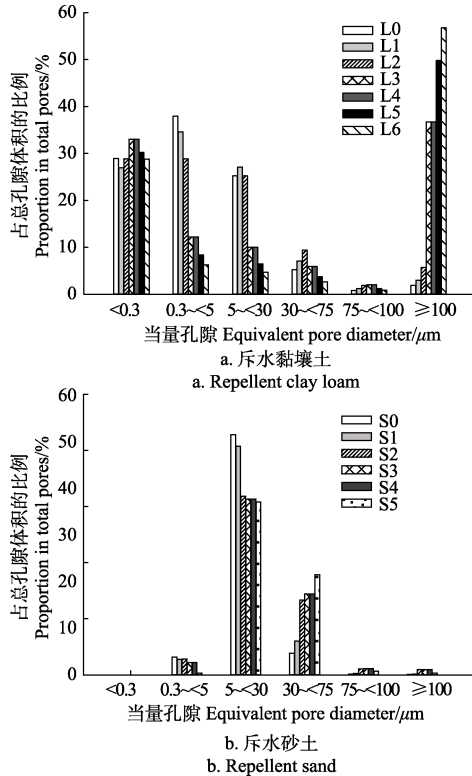


图3 不同土壤斥水程度对当量孔隙分布的影响
Fig.3 Effect of repellency level on equivalent pore diameters for different soils

3 结论

1) 随着斥水程度增加，在相同吸力情况下，黏壤土土-水曲线明显向左推移，土壤含水率减小；砂土土-水曲线在低吸力阶段，明显向左推移，在高吸力阶段，其土-水曲线变化不大明显。

2) 对于斥水黏壤土，随着斥水程度增加，残余含水率减小；对于斥水砂土，严重斥水以下等级的残余含水率没有差异，极度斥水的残余含水率明显小于其他斥水等级。随着斥水程度的增加，土壤进气值对数减小，进气值对数与斥水剂添加量呈极显著负线性相关($P < 0.01$)，相关系数较高($R^2 \geq 0.92$)；随着斥水程度增加，斥水黏壤土和砂土的田间持水率减小，凋萎系数没有明显差异，重力水增加，有效水和易有效水减小，易利用水比例也减小。

3) 对于斥水黏壤土，斥水程度对于极微孔隙和大孔隙含量影响不明显，而微孔隙和小孔隙随着斥水程度的增加明显减小，土壤空隙随着斥水程度的增加急剧增加；对于斥水砂土，各处理均没有极微孔隙存在，斥水程度对微孔隙、大孔隙和土壤空隙影响不大，亲水处理的小孔隙含量明显高于其他处理，强斥水、严重斥水和极度斥水的小孔隙差异不大，中等孔隙的占比随斥水程度的增加明显增加。

综上所述，斥水程度的增加导致田间持水量和易利用水比例降低、黏壤土的孔隙增加，砂土的小孔隙明显

减小，使得作物可吸收和利用的水分减少，不利于农作物的生长，应尽量避免土壤的斥水程度增加。

[参考文献]

- [1] Doerr S H, Shakesby A R A, Dekker A L W, et al. Occurrence, prediction and hydrological effects of water repellency amongst major soil and land-use types in a humid temperate climate[J]. *European Journal of Soil Science*, 2006, 57(5): 741-754.
- [2] DeBano L F. Water repellency in soils: A historical overview[J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 231-232: 4-32.
- [3] DeBano F L. Water Repellent Soils: A State of the art[M]. US. Department of Agriculture, Forest Service, General Technical Report, 1981, 82.
- [4] Doerr S H, Shakesby R A, Walsh R P D. Soil water repellency: Its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance[J]. *Earth-Science Reviews*, 2000, 51: 33-65.
- [5] Täumer K, Stoffregen H, Wessolek G. Seasonal dynamics of preferential flow in a water repellent soil[J]. *Vadose Zone Journal*, 2006, 5(1): 405-411.
- [6] Dekker L W, Ritsema C J. Wetting patterns and moisture variability in water repellent DuTch soils[J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 231-232: 148-164.
- [7] Xiong Y, Furman A, Wallach R. Moment analysis description of wetting and redistribution plumes in wettable and water-repellent soils[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 422-423: 30-42.
- [8] 陈俊英, 张智韬, 汪志农, 等. 土壤斥水性影响因素及改良措施的研究进展[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(7): 84-89. Chen Junying, Zhang Zhitao, Wang Zhihong, et al. Influencing factors and amelioration of soil water repellency[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(7): 84-89. (in Chinese with English abstract)
- [9] 雷志栋, 杨诗秀, 谢传森. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998: 18-24.
- [10] Ning Lu, William J. Likos. 非饱和土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012: 359.
- [11] Gardner W R. Availability and measurement of soil water[J]. *Water Deficits and Plant Growth*, 1968, 1: 107-135.
- [12] Woche S K, Goebel M O, Kirkham M B, et al. Contact angle of soils as affected by depth, texture, and land management[J]. *European Journal of Soil Science*, 2005, 56(2): 239-251.
- [13] Wallach R. Effect of soil water repellency on moisture distribution from a subsurface point source[J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(8): 863-863.
- [14] Durner W, Iden S C. Extended multistep outflow method for the accurate determination of soil hydraulic properties near water saturation[J]. *Water Resources Research*, 2011, 47(8): 427-438.
- [15] Wallach R, Graber E R. Infiltration into effluent irrigation-induced repellent soils and the dependence of repellency on ambient relative humidity[J]. *Hydrological Processes*, 2007, 21(17): 2346-2355.
- [16] Robichaud P R, Wagenbrenner J W, Pierson F B, et al. Infiltration and interrill erosion rates after a wildfire in western Montana, USA[J]. *Catena*, 2016, 142: 77-88.
- [17] Bughici T, Wallach R. Formation of soil-water repellency in olive orchards and its influence on infiltration pattern[J]. *Geoderma*, 2016, 262: 1-11.
- [18] 刘春成, 李毅, 任鑫, 等. 四种入渗模型对斥水土壤入渗规律的适用性[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(5): 62-67. Liu Chuncheng, Li Yi, Ren Xin, et al. Applicability of four infiltration models to infiltration characteristics of water repellent soils[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2011, 27(5): 62-67. (in Chinese with English abstract)
- [19] 陈俊英, 吴普特, 张智韬, 等. 土壤斥水性对含水率的响应模型研究[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(1): 63-67. Chen Junying, Wu Pute, Zhang Zhitao, et al. Response models

- for soil water repellency and soil moisture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(1): 63—67. (in Chinese with English abstract).
- [20] Liu H, Ju Z, Bachmann J, et al. Moisture-dependent wettability of artificial hydrophobic soils and its relevance for soil water desorption curves[J]. Soil Science Society of America Journal, 2012, 76(2): 342—349.
- [21] Bauters T W J, Steenhuis T S, Dicarolo D A, et al. Physics of water repellent soils[J]. Journal of Hydrology, 2000, (231—232): 233—243.
- [22] Bauters T W J, Steenhuis T S, Parlange J Y, et al. Preferential flow in water-repellent sands[J]. Soil Science Society of America Journal, 1998, 62(5): 1185—1190.
- [23] Ustohal P, Stauffer F, Dracos T. Measurement and modeling of hydraulic characteristics of unsaturated porous media with mixed wettability[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 1998, 33(98): 5—37.
- [24] Czachor H. Water retention of repellent and subcritical repellent soils: new insights from model and experimental investigations[J]. Journal of Hydrology, 2010, 380(1/2): 104—111.
- [25] Lamparter A. Applicability of ethanol for measuring intrinsic hydraulic properties of sand with various water repellency levels[J]. Vadose Zone Journal, 2010, 9(2): 45—450.
- [26] Diamantopoulos E, Durner W, Reszkowska A, et al. Effect of soil water repellency on soil hydraulic properties estimated under dynamic conditions[J]. Journal of Hydrology, 2013, 486(4): 175—186.
- [27] Van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(44): 892—898.
- [28] Zavala L M, Granged A J P, Jordán A, et al. Effect of burning temperature on water repellency and aggregate stability in forest soils under laboratory conditions[J]. Geoderma, 2010, 158(3): 366—374.
- [29] Doerr S H. On standardizing the ‘water drop penetration time’ and the ‘molarity of an ethanol droplet’ techniques to classify soil hydrophobicity: A case study using medium textured soils[J]. Earth Surface Processes & Landforms, 2015, 23(7): 663—668.
- [30] Van Genuchten M T, Simunek J, Leij F J. RETC software, Version 6.02, Code for quantifying the Hydraulic Functions of www.hydrus3d.com, US Salinity Laboratory, University of California Riverside.
- [31] Cameron K C, Buchan G D. Porosity and pore size distribution[M]. Encyclopedia of Soil Science, Boca Raton: CRC Press, 2006, 2: 1350—1353.

Impact of repellent levels on drainage soil water characteristic curve

Chen Junying¹, Liu Chang¹, Zhang Lin^{2*}, Xiang Youzhen¹, Leonid Gillerman³, Chai Hongyang¹

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

2. Institute of Water and Soil Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

3. J. Blaustein Institutes for Desert Research, Ben-Gurion University of the Negev, SedeBoker 84990, Israel)

Abstract: Water repellency is a widespread phenomenon in soils. Almost every soil shows water repellency to some degree. It may reduce the infiltration in soil and is easy to form finger flow. Therefore, the soil holding capacity of moisture and the yield of crops are reduced. It's very important to study the soil water characteristic curve in repellency soils. In this study, we aimed to explore the impact of repellent levels on soil hydraulic characteristics, clay loam of 7 repellent levels (treatment L0 to L6) and sand of 6 repellent levels (treatment S0 to S5) made by adding octadecyl primary amine collected from Yangling, Shaanxi. The experiment was conducted in the Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering, Ministry of Education, at Northwest A&F University in August 2016. Each of the 13 treatments had 4 replicates. Soils were mixed with octadecyl primary amine which varied from 0 as control and 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8 g/kg respectively for clay loam and 0.06, 0.08, 0.09, 0.115, 0.12 g/kg respectively for sand. The repellency level of treatment L0 and S0 was wettable, L1, L2 and S1 was slight repellent, L3, L4 and S2 were moderate, L5 and S3 were severe, and L6, S4 and S5 were extreme. The soil moisture characteristic curves were measured with a high speed centrifuge. The van Genuchten (VG) model was fitted to obtain the hydraulic parameters with RETC software. The results showed that under the same suction, the soil moisture of repellent clay loam was higher than that of repellent sand and the soil moisture decreased with the increase of repellent levels. The residual moisture and the shape parameter decreased and the reciprocal of air entry value increased rapidly with increasing the repellent levels for repellent clay loam. There was no difference in residual moisture of treatment of S0 to S3 for sand, but the residual moisture of treatment S4 and S5 was lower than the other treatments for repellent sand. The reciprocal of air entry value increased with increasing the repellent levels for repellent sand. The air entry value decreased with increasing the repellent levels for both repellent clay loam and sand. There was a significant negative linear correlation between logarithm of air entry value and the amount of octadecyl primary amine, and the determination coefficient was 0.92 and 0.93 for repellent clay loam and sand, respectively. There was no difference in wilting coefficient between the treatments for repellent clay loam and sand respectively. The field capacity, effective water and easily available water decreased with the increase of the repellent levels for both repellent clay loam and sand. Meanwhile, the gravity water showed a decreasing trend. The results also showed that there was no difference in the proportion of micropore and macropore while the micro-porosity and porosity decreased with the increase of water repellency, with increasing the repellent levels for repellent clay loam. The soil voids increased sharply with the increase of repellent level for repellent clay loam. The micropore did not exist in repellent sand. There was no difference in the proportion of micropores, macropores and soil voids with the repellent level for repellent sand. The proportion of small pore of S0 was significantly higher than the other treatments but there's no difference between S1 to S5. The proportion of medium porosity increased obviously with the increase of repellent levels for sand. Therefore with the repellency increase, field capacity, easily available water and micropore of sand decreased, and soil porosity of clay loam increased. It led the water that crop can absorb reduced. Repellency was uncondusive to crops growth. We should try to avoid the increase in soil water repellency level. This study can provide valuable information for the infiltration, evaporation and numerical simulation of repellent soil.

Keywords: soil moisture; porosity; drainage; soil water characteristic curve; repellency